

RESISTENCIA AL ENVEJECIMIENTO DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE: BENEFICIOS Y LIMITACIONES DE LA INCORPORACIÓN DE FÍLLERES COMERCIALES. PRIMERA PARTE: ESTUDIOS EN BASE AL METODO UCL.

Autores: Hugo D. Bianchetto *, Rodrigo Miró Recasens**, Félix Pérez Jiménez **

* Universidad Nacional de La Plata, Laboratorio de Pavimentos e Ingeniería Vial (LaPIV), Facultad de Ingeniería. Calle 1 y 47, (B1900TAG) La Plata, Argentina.

Tel/fax: +0054-221-4236687; e-mail: lapiv@ing.unlp.edu.ar; hbianche@ing.unlp.edu.ar

** Universidad Politécnica de Cataluña, España. Laboratorio de Caminos, ETSE de Caminos, Canales y Puertos.

Grupo RILAIC (Red Ibero-Latinoamericana de Investigación en Carreteras), www.rilaic.com

RESUMEN

Muchas capas bituminosas de rodadura fallan por problemas asociados al daño por envejecimiento antes que por las solicitaciones impuestas por los vehículos. Frente a esta problemática se han intentado soluciones en el diseño que consisten frecuentemente en aumentar el contenido de asfalto en las mezclas para lograr una película de ligante de mayor espesor envolviendo a los áridos y reducir el porcentaje de vacíos. Sin embargo, un exceso de betún suele derivar en exudaciones y escurrimientos, además de encarecerse el producto final.

Pero lo usual es que las especificaciones técnicas para obras de pavimentación asfáltica no consideren convenientemente el *factor envejecimiento* al establecer sus prescripciones, insistiéndose en caracterizar el comportamiento de los ligantes frente a los mecanismos responsables del “endurecimiento por edad” a partir de ensayos empíricos de simulación que únicamente tienen en cuenta el material ligante de forma aislada y no la interacción que se produce con los otros componentes de la mezcla.

Son conocidas las potenciales ventajas del uso de fílleres en lo que a resistencia al envejecimiento se refiere; sin embargo, a menudo no se tienen en cuenta otros conceptos asociados al sistema bifásico fíller-betún y que influyen sobre una serie de características fundamentales de las mezclas.

Las Universidades de La Plata, Argentina, y Politécnica de Cataluña, España, realizaron una investigación conjunta con fines de esclarecer algunos fenómenos relacionados con el

envejecimiento de los ligantes y de establecer pautas de diseño que contribuyan a optimizar la resistencia al deterioro de las mezclas bituminosas; en la misma, se emplearon nuevos procedimientos de estudio: el método funcional “Universal de Caracterización de Ligantes” (UCL[®]), ensayos reológicos con el reómetro dinámico de corte (DSR) y técnicas de analítica macromolecular como la cromatografía por permeación de geles (GPC) y la espectroscopía infrarroja.

En esta primera parte del trabajo se presenta una síntesis de los resultados obtenidos utilizando el método Universal de Caracterización de Ligantes, UCL[®].

I. INTRODUCCION

El envejecimiento de las mezclas bituminosas es uno de los factores que más inciden en el acotamiento de la vida útil de los pavimentos. Sus consecuencias incluyen tanto la disminución de las condiciones de confort y seguridad como el perjuicio económico que significa realizar tareas frecuentes de mantenimiento y rehabilitación.

Este fenómeno ha sido objeto de numerosos estudios. Sin embargo, la mayoría de los análisis se han realizado directamente sobre los ligantes de forma aislada, evaluándose el “factor envejecimiento” mediante la caracterización de los mismos a partir de ensayos de película delgada (TFOT, RTFOT, Rotavapor) que tratan de simular en forma acelerada algunos mecanismos que influyen en este proceso de deterioro, como la volatilización de las fracciones livianas y la oxidación. Estos métodos no permiten predecir cabalmente el comportamiento del material durante su etapa en servicio, pues la interacción árido-ligante y la influencia del relleno mineral y de otros eventuales aditivos alteran significativamente las cualidades de la fase bituminosa en el conjunto.

La irrupción de los ligantes modificados con polímeros en la industria vial incorporó otro interrogante acerca de la validez de estos procesos tradicionales de clasificación y análisis.

Este panorama ha ido cambiando recién en los últimos años ante la aparición de nuevas técnicas que tratan de reproducir cómo actúa y qué procesos de transformación sufre el asfalto cuando se degrada por envejecimiento en las mezclas bituminosas; tales metodologías contemplan no sólo las características intrínsecas de los ligantes, sino también sus propiedades como parte integrante de un conjunto con los áridos y el filler. Varios investigadores se abocaron a desarrollar ensayos y modelos que permitiesen una mejor evaluación de los ligantes *en función de las propiedades que proporcionan a las mezclas*; por esta razón, estos procedimientos reciben el nombre de “*funcionales*”.

La propiedad fundamental de las mezclas bituminosas para carreteras es su capacidad de deformarse sin romper al absorber esfuerzos relativamente elevados y repetidos; éste es el principio de funcionamiento de los pavimentos flexibles. La medida esencial para tal comportamiento es la resistencia al corte, con sus dos componentes: la fricción y la cohesión. El factor friccional se analiza generalizando los postulados de la mecánica de suelos al estudio de las mezclas asfálticas, puesto que los áridos conforman una estructura granular; en cambio, la cohesión debe evaluarse a partir de las propiedades reológicas del medio continuo presente en la mezcla, el sistema filler-betún, que define su comportamiento ante las solicitaciones deformantes. Por tales razones, es más apropiado pensar en las cualidades que el *mástico* proporciona a la mezcla, en lugar de considerar aisladamente al ligante. La incorporación de filleres a las mezclas permite mejorar las propiedades del medio continuo bituminoso: espesar el asfalto con el fin de modificar su fluir viscoso, mejorar la adherencia y proveer de un mayor espesor a la lámina que recubre a los áridos, permitiendo retardar el envejecimiento.

En una mezcla asfáltica, la cantidad y naturaleza del filler a incorporar debería variar en función de las propiedades volumétricas y físico-mecánicas que se pretendan obtener. En Argentina se acota la adición de filler con el fin de no exceder un determinado grado de concentración en volumen del sistema filler-betún ("concentración crítica"); el hecho de dosificar racionalmente el mástico permite prever la proporción máxima a adicionar sin sacrificar la resistencia a las deformaciones por sobrefillerización, ya que un exceso de la relación filler/betún traerá aparejada una elevada rigidez.

En mezclas muy expuestas a los factores climáticos, como las drenantes y otras con contenidos elevados de vacíos, la función del mástico sigue siendo trascendental, a pesar que ya no constituye propiamente un medio continuo que llena los huecos de la fase pétreo. En estas mezclas, el mástico otorga cohesión al conjunto, mejora la adhesividad árido-ligante y provee una lámina de mayor espesor alrededor del árido que la que hubiese existido con asfalto sólo, disminuyendo los procesos de volatilización y oxidación. De hecho, además del empleo de asfaltos modificados y de áridos de buena calidad, la adición de un filler apropiado ha sido otra de las razones del avance tecnológico de las mezclas con granulometría discontinua, que ganaron confiabilidad con el transcurso de los años.

Las especificaciones técnicas argentinas exigen que, para mezclas elaboradas con ligantes convencionales, la *concentración volumétrica* C_v del relleno mineral no debe superar su *concentración crítica* C_s (relación $C_v/C_s \leq 1$); incluso, para estar del lado de la seguridad, a menudo se especifican valores límite menores a la unidad. La norma de aplicación es la

IRAM 1542. Este precepto de base racional debe sin embargo ser objeto de una minuciosa revisión, pues la normativa no contempla ni la utilización de ligantes modificados, ni la adopción de mezclas discontinuas como alternativa para capas de rodamiento.

Pero más allá de los criterios esgrimidos para diseñar una determinada mezcla, su formulación debería llevar a obtener pavimentos con mejores prestaciones durante el mayor tiempo posible, para lo cual reviste capital importancia la optimización de su resistencia al envejecimiento. La realidad indica, sin embargo, que esta temática aún no ha sido considerada convenientemente por los técnicos a la hora diseñar las mezclas bituminosas.

La Universidad Politécnica de Cataluña ha desarrollado distintas metodologías para el estudio de los ligantes bituminosos. En particular, en lo que respecta al “factor envejecimiento”, el método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL[®]), basado y fundamentado en el ensayo Cántabro de abrasión por desgaste, permite evaluar la respuesta funcional que diferentes tipos de másticos brindan a mezclas con características granulométricas preestablecidas, cuantificando las pérdidas por disgregación debido a la disminución de las propiedades cohesivas por causa del envejecimiento y de las condiciones térmicas extremas durante la aplicación de las cargas.

En este trabajo se propone efectuar una evaluación de los beneficios que pueden obtenerse al adicionar fílleres a las mezclas bituminosas a fin de aumentar su resistencia al envejecimiento, mediante metodologías y técnicas de estudio del comportamiento funcional de los ligantes asfálticos. Las variables analizadas han sido el tipo y la naturaleza de ligante y de fíller y las proporciones relativas entre estos materiales. La herramienta básica utilizada en esta primera parte ha sido el método Universal de Caracterización de Ligantes, UCL[®], aplicado al estudio del sistema bifásico filler-betún (“mástico”) con el objeto de observar la evolución de sus características al ser sometido a envejecimiento en laboratorio.

II. EL METODO UCL Y SU UTILIDAD PARA EVALUAR LA RESISTENCIA AL ENVEJECIMIENTO

El Método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL[®]) fue desarrollado en la Universidad Politécnica de Cataluña por los doctores Pérez Jiménez y Miró Recasens. Basado en la aplicación del ensayo Cántabro, es un procedimiento directo y sencillo que evalúa las propiedades funcionales del ligante a partir de la determinación del grado de cohesión que proporciona a una mezcla patrón y de la observación de cómo esta cualidad varía con la temperatura, la acción del agua y el envejecimiento. Es una tecnología de fácil

ejecución y que ofrece una novedosa herramienta para clasificar y cotejar los distintos betunes que podrían utilizarse en una determinada obra de pavimentación, pues permite diferenciar el comportamiento de ligantes, incluso aquellos que poseen propiedades similares según la caracterización tradicional y, además, manifestar las diferencias entre diversos betunes-polímero entre sí, y entre éstos y los convencionales.

Se dio a este procedimiento el nombre de universal por ser aplicable a cualquier betún. El principio del mismo es comparar directamente las respuestas de estos materiales como parte integrante de una mezcla asfáltica, exaltando sus diferencias relativas y las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos. Se evalúan cuatro propiedades funcionales que los ligantes han de aportar al comportamiento de las mezclas bituminosas: cohesión, susceptibilidad térmica, adhesividad y resistencia al envejecimiento.

Se fabrica una mezcla patrón abierta, sin filler ni finos, con unos áridos tipo. La granulometría T5, la más difundida en la utilización del método, está constituida por áridos con tamaños comprendidos entre los tamices N°4 y N°30. Se elaboran probetas Marshall siguiendo el criterio de equiviscosidad de los ligantes para la selección de la temperatura de moldeo. Las probetas se someten a diferentes condiciones (en seco, tras inmersión, a distintas temperaturas y períodos de envejecimiento) y son ensayadas al Cántabro (NLT-352 y NLT-362). El ensayo Cántabro de pérdidas por desgaste consiste en someter una probeta Marshall a un efecto abrasivo mediante el uso del tambor de la máquina de Los Angeles, sin la carga abrasiva que se emplea para el ensayo de desgaste de áridos, haciéndolo girar 300 vueltas y determinándose la pérdida porcentual de masa de la probeta.

La cohesión se valora determinando las pérdidas en el ensayo Cántabro, en seco y a 25 °C. La susceptibilidad térmica se analiza variando la temperatura de las probetas que son sometidas al ensayo Cántabro y determinando las *Curvas de Estado* o variación de las pérdidas con la temperatura; para ello, previo al ensayo, se las mantiene 6 horas a la temperatura con la cual ingresarán al tambor de Los Angeles (el cual se mantiene siempre a 25 °C). La disminución de la resistencia a la disgregación en el ensayo Cántabro a 25 °C, tras mantener las probetas sumergidas en agua (un día a 60 °C) es una medida de la pérdida de adhesividad. Para evaluar el envejecimiento, el método asume que el ligante forma una película fina sobre el árido al utilizar probetas con altos contenidos de vacíos, las cuales se someten a distintos períodos en estufa a elevada temperatura y con ventilación forzada y que posteriormente se ensayan siguiendo el procedimiento estipulado por el ensayo Cántabro.

La fotografía de la **Figura 1** ofrece un ejemplo de los efectos del envejecimiento sobre las mezclas UCL: la probeta N°1 está sin ensayar; la N°2 fue ensayada sin ser sometida a envejecimiento; y la N°3 fue ensayada tras 7 días de envejecimiento en estufa a 80 °C.

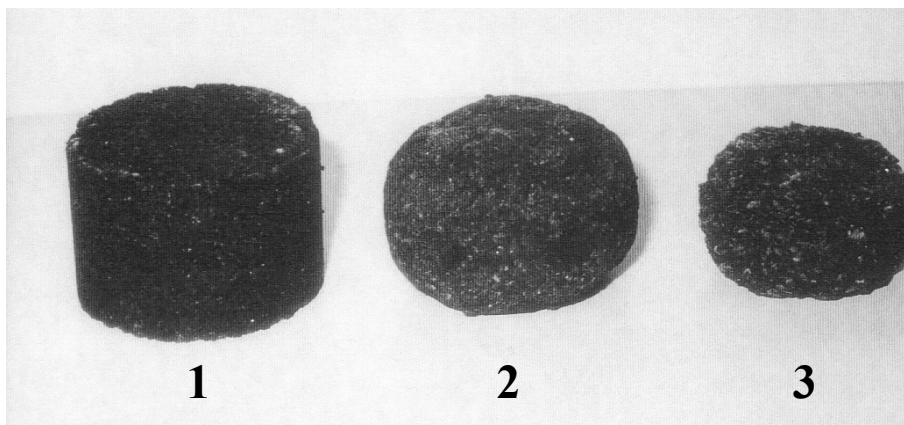


Figura 1. Efecto del envejecimiento, probetas UCL: (1) sin ensayar; (2) ensayada sin envejecer; (3) ensayada tras 7 días de envejecimiento

El método también propone un criterio de clasificación de ligantes por grado según el cual, para probetas UCL con un 28 % de vacíos, se define la *temperatura de fragilidad* como aquella en la que se alcanza una pérdida del 60 % a bajas temperaturas, y la *temperatura de inconsistencia* como la correspondiente al 70 % de pérdidas a elevadas temperaturas.

Una variante interesante es considerar conjuntamente la resistencia al envejecimiento y la susceptibilidad térmica, lo cual permite graficar un Haz de Curvas de Estado, como se verá más adelante.

En este trabajo se han elaborado mezclas patrón variando el tipo de ligante y el tipo y las proporciones de rellenos minerales comerciales, a fin de evaluar cómo influyen estas variables en la resistencia al envejecimiento de las mezclas.

III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El plan de trabajos incluyó una serie de estudios y ensayos para analizar el comportamiento de una mezcla patrón elaborada con distintos asfaltos y con diferentes tipos y proporciones de filleres, sometidas a envejecimiento acelerado en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña. De esta manera, se ha pretendido profundizar el conocimiento acerca de los beneficios de la incorporación de filleres en la resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas.

Variando el tipo de asfalto, las temperaturas de ensayo, el tipo y contenido de fíller y el grado de envejecimiento, se llevó a cabo el desarrollo experimental empleando el método UCL, obteniéndose las correspondientes Curvas de Estado. Las temperaturas de ensayo fueron: -10, 5, 25, 40, 60 y 70 °C, mientras que los períodos de envejecimiento abarcados fueron de 0, 2, 4 y 7 días, a 80 °C. Se efectuaron pruebas con dos betunes-polímero (SBS y EVA) y un betún normal 70/100. Los fílleres utilizados fueron cal hidratada y fíller calizo, en proporciones variables respecto de sus correspondientes concentraciones críticas.

La concentración crítica es aquella en la cual el mástico comienza a rigidizarse. El sistema se hace más frágil, acentuándose dicho proceso a bajas temperaturas, lo que conlleva al empeoramiento de ciertas características buscadas en las mezclas como son la flexibilidad, la cohesión y la durabilidad. Esta concentración corresponde a una dispersión de las partículas de fíller en el betún en el estado más suelto posible pero con contacto entre ellas, es decir cuando el esfuerzo aplicado es consumido en la deformación viscosa del medio continuo bituminoso y la resistencia friccional entre las partículas tiende a un mínimo. Dicho acomodamiento de las partículas es el que aproximadamente cabe esperar en el sedimento obtenido por simple reposo de dispersiones de fíller en un medio líquido fluido y con parentesco químico con los betunes, tal como el kerosene. Por ser un ensayo de sedimentación, llamó Cs (concentración del sedimento) al valor obtenido, aunque por tratarse de un valor crítico para asegurar un comportamiento viscoso del mástico (condición necesaria para que la mezcla tenga capacidad de deformación sin fractura), se lo conoce como “Concentración Crítica” (Norma IRAM 1542) y se calcula de la siguiente manera:

$$Cs = \frac{P}{V \cdot \delta_f} \quad \textbf{Ecuación 1}$$

donde: Cs es la concentración crítica, P es el peso seco del fíller, V es el volumen asentado del fíller en keroseno anhidro después de 24 horas y δ_f es el peso específico del fíller

Al adicionar fíller a las mezclas se produce un incremento progresivo de la viscosidad del mástico bituminoso, que es función de la concentración volumétrica del fíller en el mismo:

$$Cv = \frac{\text{Vol. fíller}}{\text{Vol. fíller} + \text{vol. betún}} = \frac{\frac{P_f}{\gamma_f}}{\frac{P_f}{\gamma_f} + \frac{P_b}{\gamma_b}} \quad \textbf{Ecuación 2}$$

donde: P_f es el porcentaje en peso del fíller, P_b es el porcentaje en peso del betún, γ_f es el peso específico del fíller y γ_b es el peso específico del betún.

Cuando C_v supera el valor de la concentración crítica C_s , el sistema bifásico deja de ser viscoso y aparece una estructura interna que determina un neto fluir no-newtoniano, tendiendo a rigidizar la mezcla.

III.1.-. Materiales empleados

La granulometría de las mezclas patrón UCL se recoge en la **Tabla 1**.

Tabla 1: Método UCL – Granulometría T5

Tamiz UNE [mm]	Pasa [%]
5	100
2,5	20
0,63	0

El contenido de ligante de la mezcla patrón es constante, 4,5 % en peso sobre los áridos. Esta mezcla patrón es altamente porosa, del orden de 28 % de vacíos. La temperatura de fabricación se reguló dependiendo de la naturaleza del ligante; en rigor, se decidió adoptar un criterio de equiviscosidad, fijándose para el mezclado una viscosidad de 3 Poise; la temperatura resultante se obtuvo del nomograma de Heukelom.

Las probetas UCL se fabricaron, siguiendo las prescripciones del método, con una energía de compactación de 50 golpes por cara. Los resultados que se informan son valores medios de grupos compuestos por un mínimo de tres probetas.

Se utilizó un árido de trituración de naturaleza granítica, de buena calidad y, como fíller, cal hidratada y polvo calizo. Algunas características de los fílleres se indican en la **Tabla 2**; se ha considerado como “fíller” a la fracción de la cal que pasa el tamiz N° 200. Las características de los ligantes bituminosos se recogen en la **Tabla 3**.

Tabla 2: Características de los fílleres utilizados

	Cal hidráulica	Fíller calizo
Peso específico aparente [gr/cm³] (NLT-155)	2,351	2,771
Densidad Aparente en Tolueno [gr/cm³] (NLT-176)	0,53	0,63
Concentración crítica (VN E-11; Argentina)	0,17	0,37

Tabla 3: Características de los ligantes bituminosos empleados

Ensayo	B-70/100	AMP-EVA	AMP-SBS
Penetración [0,1 mm] (NLT-124/84)	83	62	65
Punto de reblandecimiento [°C] (NLT-125/84)	46	67	68
Punto de Fragilidad Fraass [°C] (NLT-182/84)	- 10	- 14	- 18
Intervalo de plasticidad [°C]	56	81	86
Recuperación elástica [%] (NLT-329/91)	- -	45	73
Viscosidad rotacional Brookfield (NLT-375/95)			
a 60 °C [Poise]	1.230	- -	- -
a 100 °C [Poise]	25,9	88	220
a 135 °C [Poise]	3,2	10,6	17,8
a 150 °C [Poise]	1,6	4,2	7,2

III.2.- Resultados obtenidos

III.2.1.- Efecto del envejecimiento y del contenido de fíller sobre la susceptibilidad térmica. Haces de Curvas de Estado. Efecto conjunto del tipo de ligante y del tipo de fíller.

El método UCL prevé la determinación de las *Curvas de Estado*, que reflejan la susceptibilidad térmica del ligante evaluada a partir de sus propiedades cohesivas en la mezcla patrón, en todo un rango de potenciales temperaturas de servicio. Con la finalidad de evaluar cómo esta propiedad es afectada por el envejecimiento del ligante, en este trabajo se ha propuesto la realización de los ensayos después de someter las probetas UCL a diferentes períodos de envejecimiento en estufa y la posterior elaboración del denominado *Haz de Curvas de Estado*, en el cual cada curva representa la evolución de las pérdidas con la temperatura para cada grado de envejecimiento considerado. Así, es posible analizar la variación de la susceptibilidad térmica (pendientes de las curvas, a bajas y altas temperaturas) conforme el betún envejece.

Se comenzó evaluando las mezclas con cal hidratada como fíller. En las gráficas de la **Figura 2** se muestran los Haces de Curvas de Estado para la mezcla patrón con asfalto modificado con polímero SBS (AMP-SBS) y cantidades crecientes de cal. En la gráfica correspondiente a $C_v/C_s=1.3$ sólo se ha representado el haz hasta la temperatura de 40 °C, pues fue producto de ensayos complementarios y no se tuvo en cuenta, por poco significativo, el efecto a altas temperaturas.

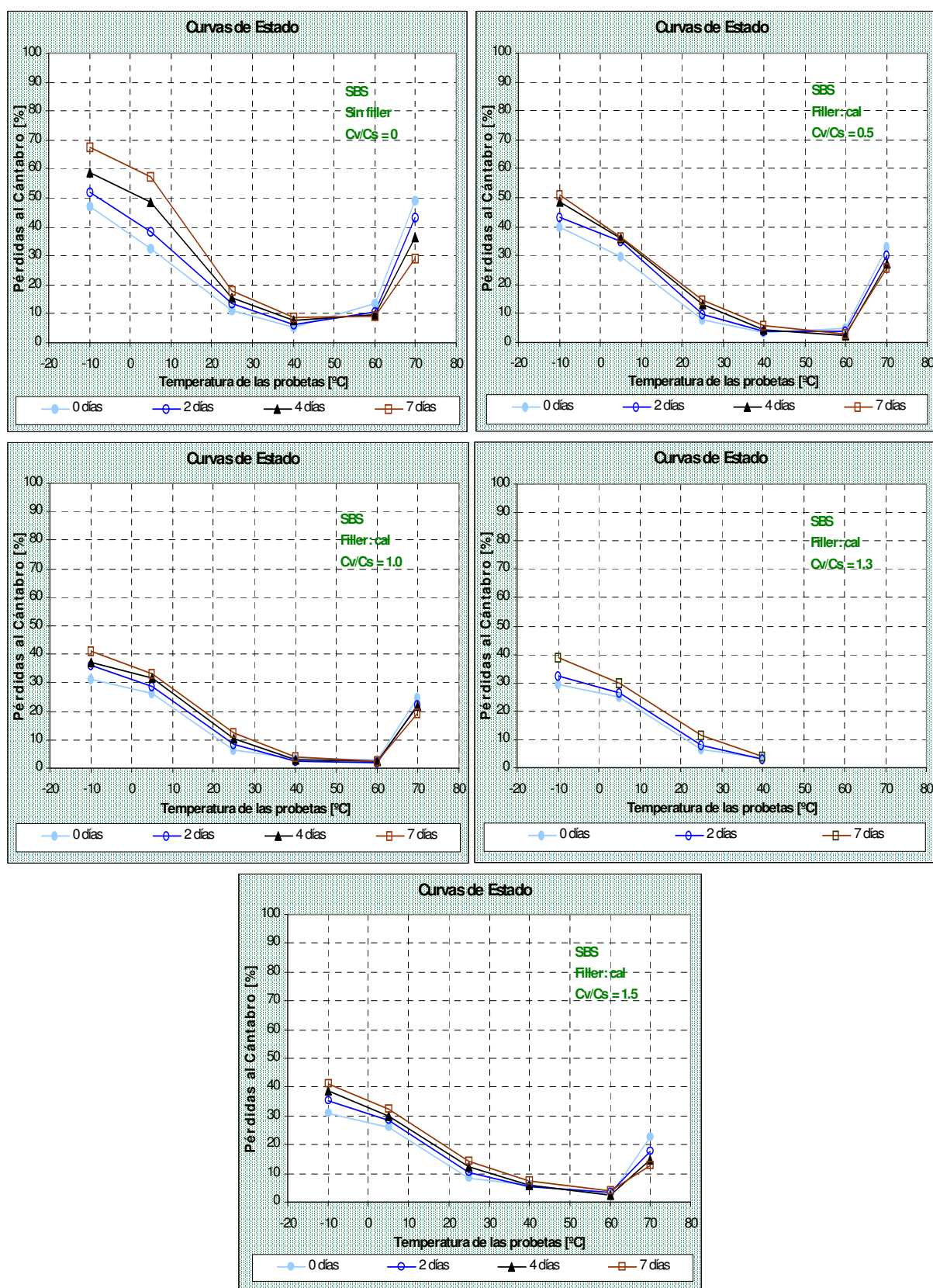


Figura 2: Curvas de Estado. Mezclas con AMP-SBS y cal. Incidencia del envejecimiento y del contenido de filler

En la mezcla sin fíller es posible apreciar que las pérdidas se incrementaron con el envejecimiento a temperaturas bajas y medias; pero además se observa el progresivo aumento de la pendiente de las curvas con el envejecimiento, efecto éste más notorio, entre 5° y 25 °C. Para temperaturas elevadas, más de 50 °C, las pérdidas disminuyeron con el envejecimiento; este efecto es debido a que el ligante endurece y es capaz de soportar mayores temperaturas antes de su ablandamiento.

Para mayores proporciones de cal, las pérdidas disminuyeron a cualquier temperatura de ensayo y edad de envejecimiento, aunque las consecuencias han sido más notorias y relevantes a bajas temperaturas, en las cuales el efecto protector del fíller ante los mecanismos de envejecimiento significó un menor endurecimiento del ligante y una mayor cohesión en las mezclas. Nótese en la **Figura 2** que, por ejemplo, la curva para 7 días de envejecimiento en la mezcla con concentración de cal $C_v/C_s=0.5$ es parecida a la curva de la mezcla sin fíller y sin envejecimiento: esto significa que la inclusión de cal en las citadas proporciones inhibió casi por completo los efectos del envejecimiento a largo plazo.

Más aún: las mezclas con concentraciones de cal $C_v/C_s=1.0$ y 1.3 ofrecieron, para 7 días de envejecimiento, menores pérdidas que la mezcla sin fíller no envejecida. La tendencia parece comenzar a revertirse sutilmente cuando la concentración de este fíller continúa incrementándose ($C_v/C_s=1.5$), esbozándose una influencia más acentuada de la rigidización del mástic que de la merma de endurecimiento del betún debido a la protección del fíller.

La **Tabla 4** esclarece algunos de estos conceptos. En ella se indican, a modo de ejemplo, las diferencias de pérdidas en el ensayo Cántabro a 5 °C, que experimentan las mezclas con betún-polímero SBS y con cal como fíller, para cantidades crecientes de fíller y distintos niveles de envejecimiento, tomando como referencia a las probetas sin envejecer y sin fíller.

**Tabla 4. Diferencias de pérdidas respecto del valor de referencia “0 días y sin fíller”.
Mezclas UCL con SBS y cal, ensayadas a 5 °C**

Cv/Cs	Diferencias de pérdidas [%]	
	Sin envejecer	Envejecim. 7 días
0	0 (referencia)	+ 24,5
0,5	- 2,8	+ 4,0
1,0	- 6,6	+ 0,7
1,3	- 7,5	- 3,7
1,5	- 6,6	- 0,4

En principio, la relación óptima C_v/C_s estaría en el entorno de 1.3; además, es posible valorar el efecto de la adecuada fillerización al comparar que las pérdidas a 7 días de envejecimiento, en mezclas con una proporción igual a este “óptimo”, son menores que las correspondientes a mezclas sin envejecer y sin filler. Esto demuestra el efecto resistente al envejecimiento que aporta la cal hidratada. Lo expresado en este ejemplo se reiteró cuando se utilizaron los otros ligantes y también al emplearse como filler el polvo calizo.

A temperaturas medias y altas no se han visualizado, en estas mezclas con AMP-SBS, cambios importantes en lo referente a pérdidas a medida que se incorporaron cantidades crecientes de cal. Esto puede atribuirse a varias razones; en primer lugar, al hecho que las pérdidas han sido generalmente bajas y, por lo tanto, las pequeñas variaciones porcentuales pierden entidad; y además, porque si bien la protección del filler al envejecimiento significaría una menor dureza del ligante, por otra parte se produce un aumento de consistencia del mástico por la simple razón de contener más relleno mineral, compensándose en cierta forma los efectos.

En las mezclas en las cuales se empleó betún modificado con EVA se ha observado que, a iguales condiciones de fillerización y de envejecimiento, las pérdidas fueron, en general, mayores que con el betún polimerizado con SBS; esto puede atribuirse a las mejores propiedades ligantes y elásticas de éste último. En carácter de ejemplo, se ofrecen los Haces de Curvas de Estado de las mezclas UCL fabricadas con betún-polímero EVA, sin filler y con una proporción de cal $C_v/C_s=1.0$, **Figura 3**.

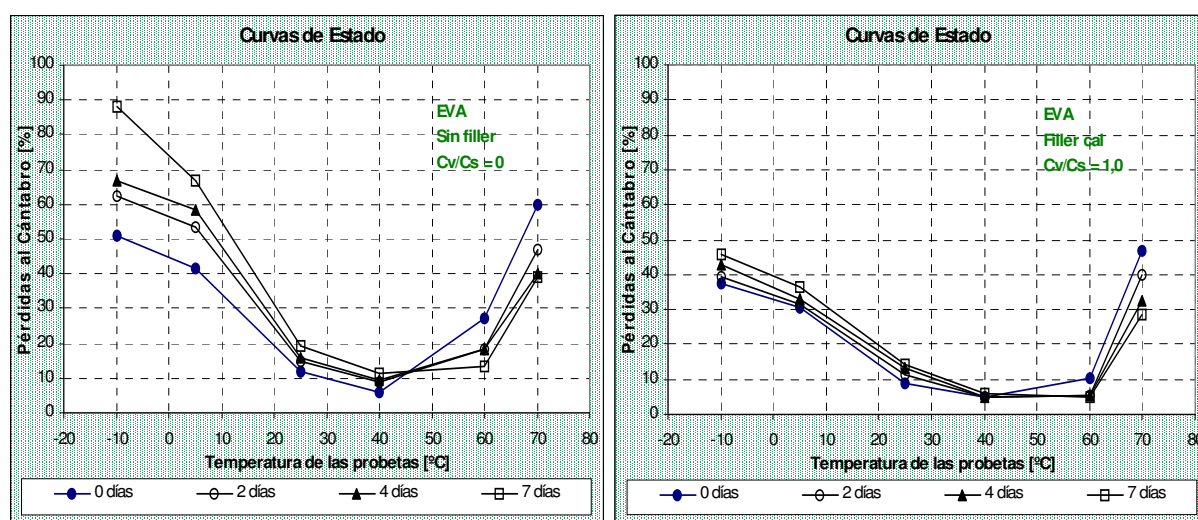


Figura 3: Curvas de Estado. Mezclas con AMP-EVA y cal. Incidencia del envejecimiento y del contenido de filler

Un hecho remarcable es que, cuando las mezclas con AMP-EVA fueron fabricadas sin filler y envejecidas a 7 días, se degradaron notablemente para bajas temperaturas y acusaron

también pérdidas acentuadas a 70°C. Esta circunstancia indica la necesidad de fillerizar las mezclas con EVA cuando estén sometidas en servicio a condiciones meteorológicas extremas, es decir veranos muy cálidos e inviernos muy fríos. Al adicionar cal, su comportamiento mejora ostensiblemente.

Cuando las mezclas fueron elaboradas con ligante convencional (sin modificar) y con cal, ha sido posible observar pérdidas mucho mayores que cuando se emplearon ligantes modificados, especialmente a las temperaturas extremas de ensayo (**Figura 4**).

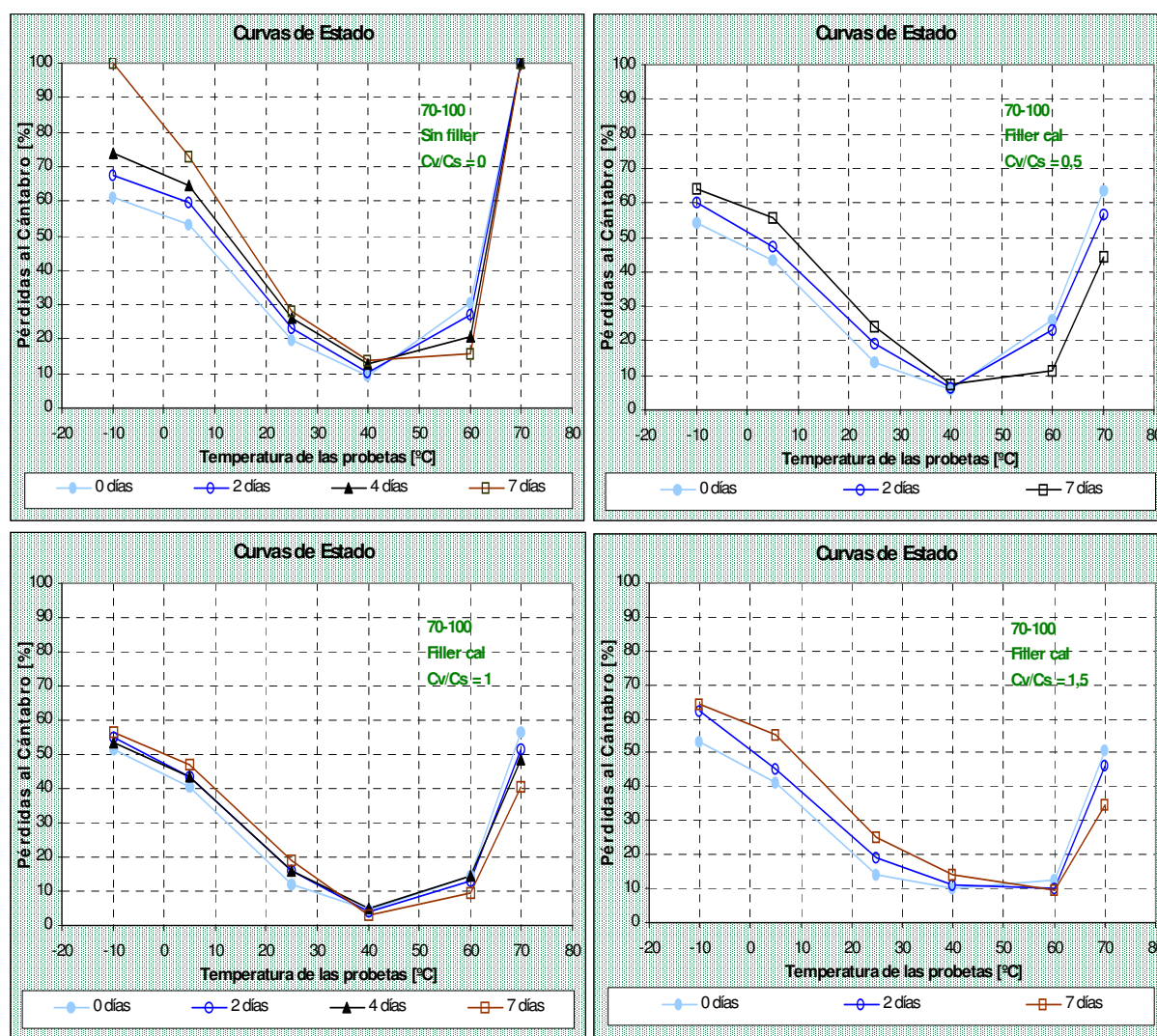


Figura 4: Curvas de Estado. Mezclas con asfalto convencional y cal. Incidencia del envejecimiento y del contenido de filler

En este caso también se ha puesto de manifiesto el efecto beneficioso de la incorporación de cal en tanto no se sobrepasase la concentración crítica, pues con exceso de filler se advirtieron mayores pérdidas a bajas temperaturas, especialmente en las probetas envejecidas. Esto es atribuible, nuevamente, a una rigidización del mástico de tal magnitud

que predomina por encima del efecto favorable del fíller en la resistencia al envejecimiento del asfalto. En cambio, a muy elevadas temperaturas se ha observado claramente el efecto beneficioso de la adición, incluso en exceso, de estos fílleres en la mezcla.

En la **Tabla 5** se muestra cómo comienza a manifestarse la sobrefillerización en las mezclas con asfalto convencional. Las consecuencias son mucho más visibles cuando aparece el factor envejecimiento. Se vierten, a modo de ejemplo, las diferencias de pérdidas en ensayos a 5 y 25 °C, para las mezclas con ligante convencional y con cal como fíller, para cantidades crecientes de fíller y distintos niveles de envejecimiento, comparando con las probetas sin envejecer y sin fíller que obran a modo de referencia. Nuevamente es posible apreciar que las mezclas envejecidas a 7 días y con una proporción óptima de fíller, arrojaron menores pérdidas que las mezclas sin envejecer pero sin fíller. Resultados similares se han obtenido al ensayar a otras temperaturas medias y bajas.

Tabla 5. Diferencias de pérdidas al Cántabro respecto del valor de referencia “0 días y sin fíller”. Mezclas con asfalto convencional B 70-100 y cal, ensayadas a 5 °C y a 25 °C

Cv/Cs	Diferencias de pérdidas al Cántabro [%]			
	Ensayos a 5 °C		Ensayos a 25 °C	
	Sin envejecer	Envej. 7 días	Sin envejecer	Envej. 7 días
0	0 (referencia)	+ 19,6	0 (referencia)	+ 8,5
0,5	- 9,8	+ 2,7	- 5,5	+ 4,7
1,0	- 12,8	- 5,9	- 7,3	- 0,6
1,5	- 12,1	+ 2,1	- 4,1	+ 5,4

Analizando desde otra perspectiva, es posible representar las Curvas de Estado manteniendo constantes el tipo de ligante, el tipo de fíller y el tiempo de envejecimiento, variando la relación Cv/Cs. Se advierten nuevamente las consecuencias conjuntas de la sobrefillerización y el envejecimiento. A bajas temperaturas, un exceso de fíller significa mayores pérdidas que las que se obtienen con relaciones Cv/Cs cercanas a las óptimas, las cuales, como se verá más adelante, dependen del tipo de ligante. Tómense como ejemplo dos gráficas, una para asfalto convencional y otra para modificado, **Figura 5**.

Se ve que, para una mezcla elaborada con asfalto convencional y cal y con 7 días de envejecimiento, el hecho de sobrefillerizar (Cv/Cs=1.5) implica, a temperaturas bajas y moderadas (desde -10 °C hasta 25 °C), mayores pérdidas que en la mezcla con Cv/Cs=1.0; en tanto que para temperaturas superiores, el exceso de fíller y la consiguiente rigidización de la mezcla, obran de manera beneficiosa.

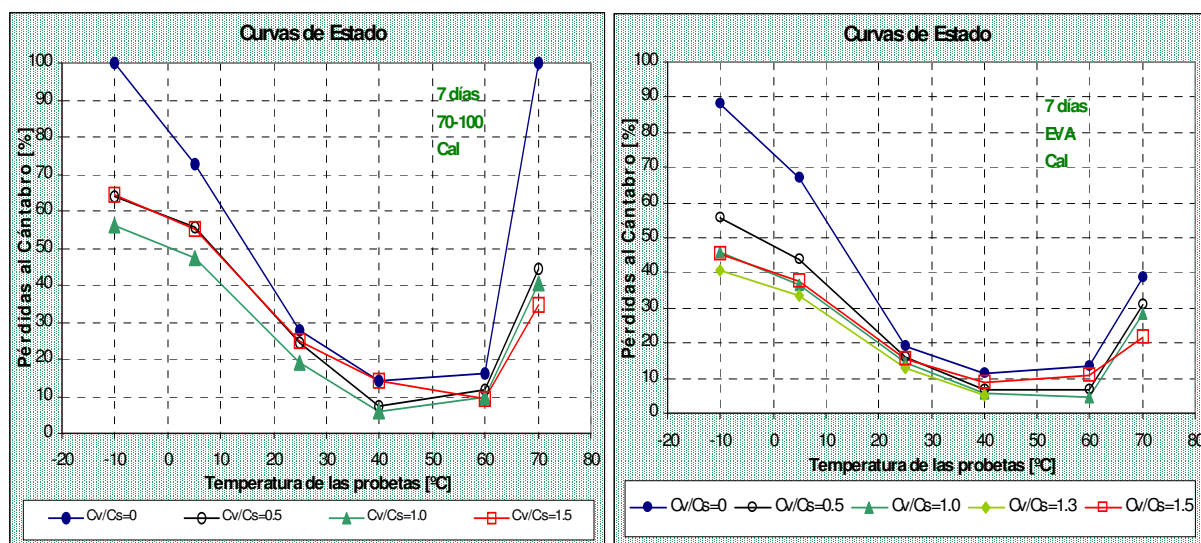


Figura 5: Curvas de Estado. Mezclas con asfalto convencional y con AMP – EVA, fillerizadas con cal, 7 días de envejecimiento. Incidencia de la concentración de filler

Por su parte, el análisis correspondiente a mezclas elaboradas con ligantes modificados ofreció algunas diferencias significativas de comportamiento: el valor óptimo parece encontrarse en el entorno de $C_v/C_s=1.3$ y recién se advierte la sobrefillerización para relaciones $C_v/C_s=1.5$.

En las mezclas en las que se empleó polvo calizo como relleno mineral, los resultados conseguidos guardaron una razonable relación con los obtenidos para mezclas con cal, aunque debe destacarse que para alcanzar una misma concentración C_v/C_s es necesario una proporción en peso mucho mayor de filler calizo que de cal. El ejemplo de la **Figura 6** permite comparar las pérdidas de las mezclas elaboradas con ambos filleres, con una concentración $C_v/C_s=1.0$ y con 2 días de envejecimiento en laboratorio.

Las diferencias encontradas han sido de poca relevancia, pudiendo inferirse el similar comportamiento de las mezclas con cal y con polvo calizo, a igual relación de concentración C_v/C_s de filler, tipo de ligante y período de envejecimiento.

La gráfica incluye la mezcla con AMP-EVA y cal: las propiedades cohesivas de este ligante son mayores que las del asfalto convencional, pero menores que las del AMP-SBS. Tales situaciones se repiten para los demás períodos de envejecimiento y concentraciones de filler empleados en este estudio.

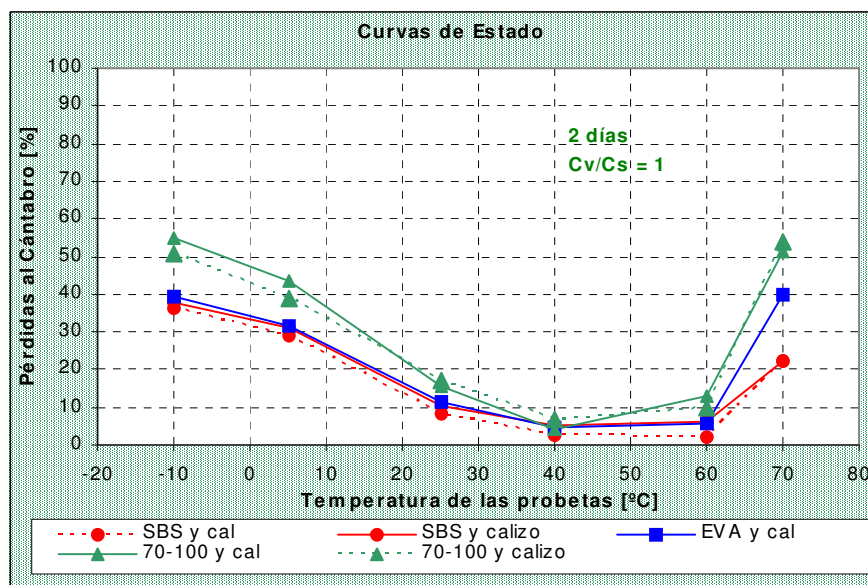


Figura 6: Curvas de Estado, mezclas con cal y con filler calizo, concentración volumétrica $C_v/C_s = 1.0$; 2 días de envejecimiento. Incidencia del tipo de filler

III.2.2.- Determinación del contenido óptimo de filler

A la luz de los resultados obtenidos, es posible determinar cuáles serían las relaciones C_v/C_s óptimas para cada tipo de mezcla desde el punto de vista de su resistencia al envejecimiento, siguiendo las premisas del método UCL. Al respecto, pueden llegar a ser útiles algunas otras correlaciones derivadas de los ensayos efectuados; por ejemplo, representando “Pérdidas al Cántabro vs. Concentración de Filler” para un tipo de ligante y un tipo de filler, con diferentes tiempos de envejecimiento y temperaturas de ensayo. Sirvan como modelo las curvas para mezclas con betún modificado con SBS y con cal, **Figura 7**.

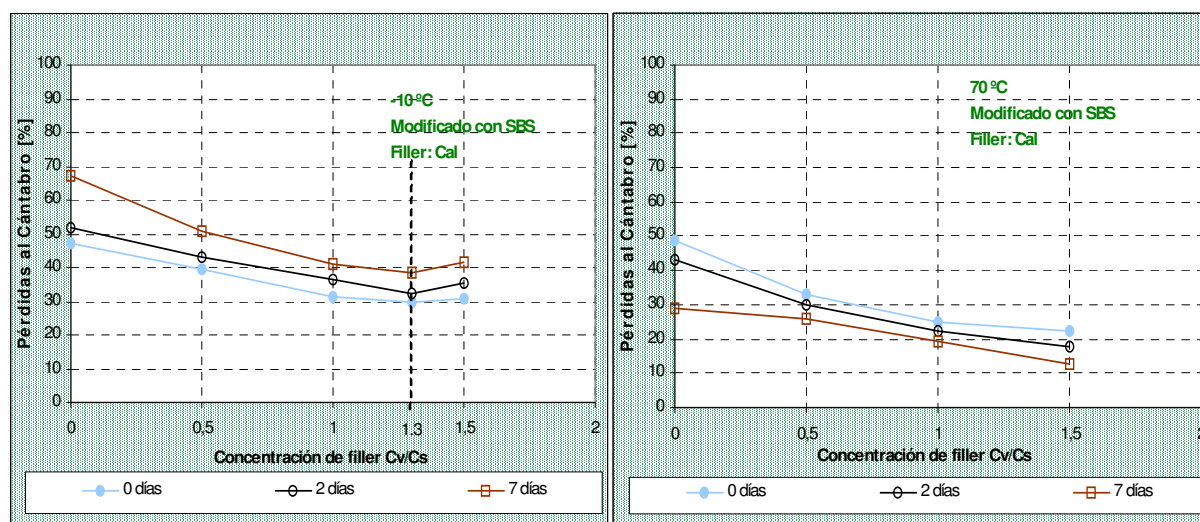


Figura 7: Pérdidas al Cántabro vs. Concentración de filler. Mezclas con AMP-SBS y cal, ensayadas a -10 °C y a 70 °C y con distintos períodos de envejecimiento

Para la condición más desfavorable considerada ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$), el óptimo se alcanza para $\text{Cv/Cs}=1.3$, aproximadamente, aunque las mezclas ofrecen un comportamiento parecido desde $\text{Cv/Cs}=1.0$ hasta 1.5 ; a partir de esta última concentración parece esbozarse la sobrefillerización. El comportamiento, para otras temperaturas bajas y moderadas, ha sido similar tanto en las mezclas con AMP-SBS como con AMP-EVA, con cal o con polvo calizo. Por su parte, a elevada temperatura ($70\text{ }^{\circ}\text{C}$), las pérdidas continuaron disminuyendo conforme se aumentaba el contenido de fíller, sin llegar a establecerse un óptimo del mismo.

En mezclas con asfalto convencional, los resultados obtenidos permiten suponer que el óptimo de fíller corresponde a la relación $\text{Cv/Cs}=1.0$. El ejemplo expuesto en la **Figura 8** muestra que las pérdidas menores se dan para concentraciones volumétricas iguales a la crítica, y que las variaciones para concentraciones Cv/Cs entre 1.0 y 1.5 son mayores a medida que la mezcla envejece; tal situación se da en todas las temperaturas bajas y medias evaluadas, tanto para las mezclas con cal como para las elaboradas con fíller calizo.

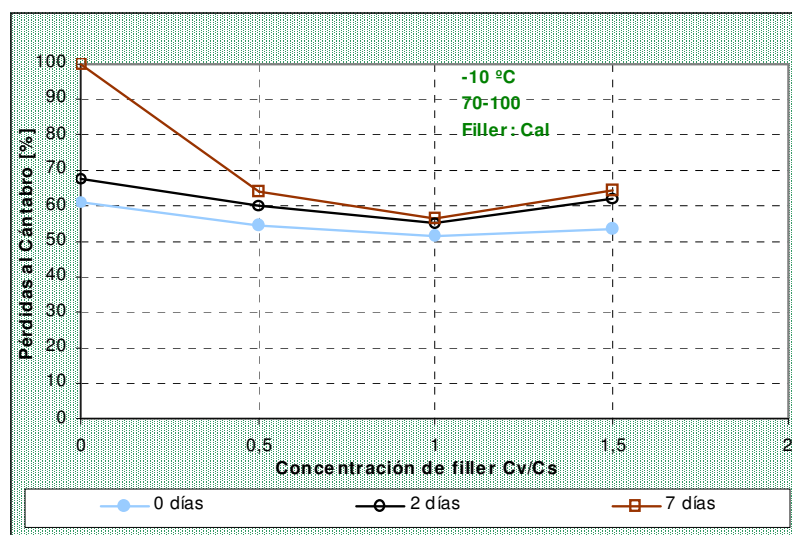


Figura 8: Pérdidas al Cántabro vs. Concentración de fíller. Mezclas con betún convencional y cal, ensayadas a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y con distintos períodos de envejecimiento

Otra forma de analizar el problema es viendo cuántos días de envejecimiento en laboratorio son necesarios para obtener las mismas pérdidas que en la condición “sin fíller y sin envejecer” y, observando el valor máximo de cada curva, establecer cual es la concentración volumétrica que permite una mayor resistencia al envejecimiento. Véase el ejemplo de la **Figura 9**, que ilustra el caso para una temperatura de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$: el óptimo de fíller corresponde a Cv/Cs entre 1.2 y 1.3 para las mezclas fabricadas con betunes-polímero; en tanto que para las elaboradas con asfalto convencional, se da para Cv/Cs entre 1.0 y 1.1 . Los resultados que se obtienen para otras temperaturas bajas y medias ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $25\text{ }^{\circ}\text{C}$), ratifican estas hipótesis.

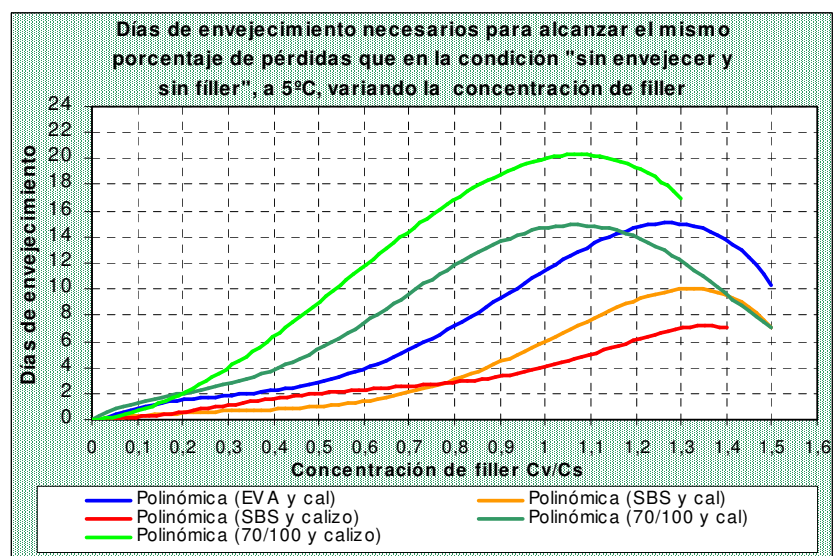


Figura 9. Criterio de determinación del contenido óptimo de filler: máxima cantidad de días de envejecimiento necesarios en las mezclas con filler para igualar las pérdidas de la condición "sin filler y sin envejecimiento" (probetas ensayadas a 5 °C)

Otro enfoque puede hacerse conjeturando a qué temperatura de ensayo se alcanza un determinado nivel de pérdidas, en un período de envejecimiento predefinido, variando la concentración de filler. Cuanto más baja es dicha temperatura, menos susceptible es el ligante a condiciones extremas de frío y, por ende, mejor es su respuesta. La **Figura 10** muestra el comportamiento de las mezclas envejecidas a 7 días, para un 45 % de pérdidas (porcentaje escogido para poder comparar los resultados disponibles, sin ninguna otra connotación en particular), corroborándose los óptimos obtenidos en la Figura 9.

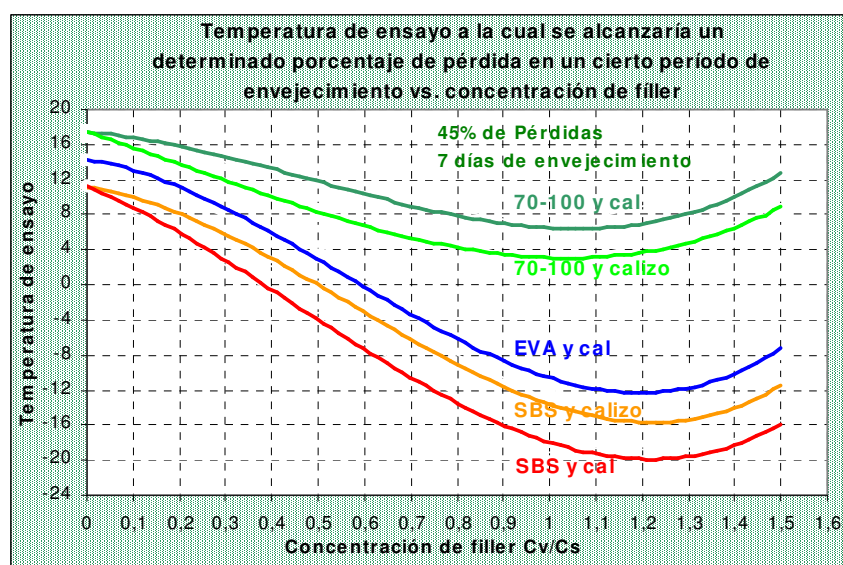


Figura 10. Criterio de determinación del contenido óptimo de filler: temperatura más baja de ensayo a la cual se alcanza un determinado porcentaje de pérdidas al Cántabro, en mezclas con 7 días de envejecimiento

IV.- CONCLUSIONES

El método Universal de Caracterización de Ligantes, UCL[®], ofrece excelentes posibilidades para estudiar la respuesta de las mezclas ante el envejecimiento y ponderar el aporte de la incorporación de fílleres para aumentar la durabilidad. La determinación de los Haces de Curvas de Estado ha permitido apreciar cómo varía la cohesión en función del envejecimiento de la mezcla y de la temperatura a la cual se aplican las sollicitaciones.

A iguales relaciones volumétricas Cv/Cs, los fílleres empleados en este estudio (cal hidratada y polvo calizo) ofrecen respuestas parecidas; pero considerando sus proporciones en peso, para lograr iguales resultados es necesario utilizar menos cantidad de cal que de polvo calizo, debido a los disímiles valores de concentración crítica de ambos fílleres.

Las mezclas fabricadas con asfaltos convencionales comienzan a rigidizarse a partir de la relación Cv/Cs=1.0, corroborándose las numerosas investigaciones que versan sobre el tema en Argentina; pero las fabricadas con betunes-polímero permitirían mayores contenidos de filler antes de alcanzarse un estado crítico, llegándose a una relación Cv/Cs=1.3 sin que se manifiesten los efectos contraproducentes de la sobrefillerización.

Los resultados obtenidos han demostrado los indudables beneficios que, respecto de la resistencia al envejecimiento, se logran al incorporar fílleres de naturaleza cálcica a las mezclas bituminosas, siempre que sus proporciones no excedan la relación crítica Cv/Cs. Además, han puesto de manifiesto, cuali-cuantitativamente, otros aspectos del comportamiento de las mezclas que es importante analizar: la mejor respuesta del betún modificado con SBS comparado con el modificado con EVA, y las significativas ventajas que, técnicamente, ofrecen los ligantes polimerizados por sobre los asfaltos convencionales.

BIBLIOGRAFÍA

- Ruiz, C. (1960): *Concentración crítica de filler, su origen y significado en la dosificación de mezclas abiertas*. Dirección de Vialidad Prov. de Buenos Aires, Argentina, Publicación N°11.
- Craus, J.; Ishai, I.; Sides, A. (1981): *Durability of bituminous paving mixtures as related to filler type and properties*. Association of Asphalt Paving Technologists 1981.
- Petersen, J; Plancher, H.; Harnsberger P. (1987): *Lime treatment of asphalt to reduce age hardening and improve flow properties*. Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 56.
- Agnusdei, J.; losco, O. (1989): *Acción de distintos tipos de rellenos minerales sobre la durabilidad de los cementos asfálticos*. 5º Congreso Latinoamericano del Asfalto, Uruguay.

- Miró Recasens, R. (1994): *Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo Cántabro*. Tesis doctoral. ETSECCP-UPC, Barcelona.
- Pérez Jiménez, F.; Miró Recasens, R. (1995): *Características mecánicas de ligantes asfálticos. Método UCL*. Revista Rutas, Madrid, Nº 48.
- Bell, C.; Kliwer, J. (1995): *Evaluation aging of asphalt mixtures*. ASCE Transportation Congress, Vol. 1.
- Lee, M.; Tia, M.; Ruth, B.; Page, G. (1997): *Comparison between the aging processes for asphalt mixtures and those for asphalt binders*. ASTM Special Technical Publication. 1322.
- Pérez Jiménez, F.; Miró Recasens, R.; Sánchez Caba, J.; Páez Dueñas, A. (1999): *Effect of aging on rheological properties of modified bituminous binders*. Eurobitume Workshop '99.
- Gubler, R.; Liu, Y.; Anderson, D.; Partl, M. (1999): *Investigation of the system filler and asphalt binders by rheological means*. Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 68.
- Pérez Jiménez, F.; Miró Recasens, R.; Martínez, A. (2001): *Evaluación de la adherencia árido-ligante mediante el Método funcional UCL. Efecto del tipo y naturaleza del filler*. 11º Congreso Iberoamericano del Asfalto (CILA), Perú.
- Bianchetto, H.; Miró, R.; Pérez, F (2001): *Aplicación del método UCL® en la caracterización de asfaltos. Experiencias en España y Argentina*. 11º CILA, Perú.
- Bianchetto, H.; Miró, R.; Pérez, F. (2001): *Hacia un análisis funcional del envejecimiento de los ligantes en las mezclas bituminosas*. XIII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito.
- Huang, S.; Petersen, J.; Robertson, R.; Branthauer, J. (2001): *Effect of hydrated lime on long-term oxidative aging characteristics of asphalt*. Transport Research Record, Vol. 1810.
- Gallego, J. (2002): *Efectos del hidrato de cal como aditivo de mezclas bituminosas*. Revista Carreteras, Madrid, Nº123.
- Verhasselt, A.; Puiatti, D. (2004): *Effect of hydrated lime on ageing behavior of bituminous mastic*. 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress-Vienna.